

Perancangan Solder Reflow Model Plat Berbasis Kontrol Logika Fuzzy Menggunakan ESP32

Reza Bagas Kurnia, Sidik Nurcahyo, Eka Mandayatma

e-mail: rezabagas592@gmail.com, sidik.nurcahyo@polinema.ac.id, eka.mandayatma@polinema.ac.id

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 16 Juli 2023

Direvisi 2 Oktober 2023

Diterbitkan 31 Juli 2024

Kata kunci:

solder reflow
fuzzy
solder plat
ESP32

Keywords:

reflow solder
fuzzy
plate solder
ESP32

ABSTRAK

Artikel ini membahas perancangan solder reflow model plat berbasis fuzzy. Untuk menggunakan solder ini, pasta dan komponen dipasang pada PCB lalu PCB diletakkan diatas heater plat yang suhunya terkontrol fuzzy pada ruang terbuka. Masalah utama solder reflow adalah bagaimana menghasilkan pemanasan yang berubah-ubah sesuai profil penyolderan. Kontroler solder reflow mentracking setpoint suhu yang berubah menurut waktu, terdiri atas fase pemanasan awal, pelelehan, dan pendinginan. Kontroler Fuzzy dirancang menggunakan ESP32 dan library eFLL yang memiliki 2 input (error dan delta-error suhu), 5 keanggotaan error, 5 keanggotaan delta-error, 5 keanggotaan output, 25 rule inferensi, fuzzifikasi Mamdani dan defuzzifikasi CoA. Sensor suhu berupa termocouple tipe K dan pengondisi sinyal MAX6675. Aktuator berupa heater 1000W dan kipas AC 8x8x2,5cm, masing-masing digerakkan menggunakan driver dimmer (TRIAC). ESP32 dilengkapi program management profil penyolderan (CRUD) yang dioperasikan melalui rotary encoder KY040 dan display OLED 128x64 0.96inch. Unjuk kerja solder reflow dinilai berdasarkan rata-rata error suhu dan kualitas hasil penyolderan rangkaian flipflop melalui 2 profile penyolderan. Eksperimen yang dilakukan terhadap 5 sample memberikan hasil error suhu rata-rata sebesar 5,3%, hasil solderan baik (tanpa cacat penyolderan) dan rangkaian flipflop hasil penyolderan berfungsi normal.

ABSTRACT

This article discusses the design of a fuzzy plate-based reflow soldering iron. To use this solder, the paste and components are mounted on the PCB and then the PCB is placed on a heater plate whose temperature is fuzzy controlled in an open space. The main problem of reflow soldering is how to produce heating that varies according to the soldering profile. The solder reflow controller tracks the time-varying temperature setpoint, consisting of pre-heat, melt, and cool-down phases. Fuzzy controller is designed using ESP32 and eFLL library which has 2 inputs (error and delta-error temperature), 5 error memberships, 5 delta-error memberships, 5 output memberships, 25 inference rules, Mamdani fuzzification and CoA defuzzification. The temperature sensor is a K type thermocouple and a MAX6675 signal conditioner. The actuators are a 1000W heater and an 8x8x2.5cm AC fan, each driven using a dimmer driver (TRIAC). The ESP32 is equipped with a soldering profile management program (CRUD) which is operated via a KY040 rotary encoder and a 128x64 0.96inch OLED display. The performance of reflow soldering is assessed based on the average temperature error and the quality of the soldering results of the flipflop circuit through 2 soldering profiles. Experiments carried out on 5 samples yielded an average temperature error of 5.3%, good soldering results (without soldering defects) and the soldered flip-flop circuit functions normally.

Penulis Korespondensi:

Reza Bagas Kurnia,

Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang



Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65143.
Email: rezabagas593@gmail.com, HP/WA: +6285204873061

1. PENDAHULUAN

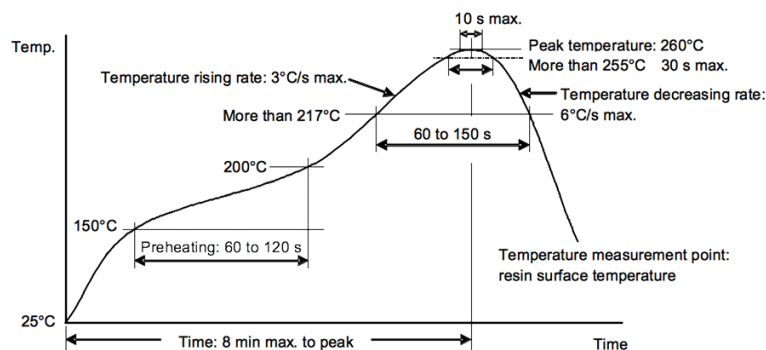
Prototipe perlu dibuat untuk mengetahui kekurangan atau kesalahan pada rancangan produk [1]. Berkaitan dengan produk elektronik, prototipe akan mencakup pembuatan PCB dan pemasangan komponen-komponen menggunakan solder. Terdapat beberapa jenis solder, seperti: solder kawat, solder dengan kontrol suhu, dan solder uap. Solder kawat adalah solder dengan bahan timah berupa kawat. Solder jenis ini yang paling umum digunakan karena harganya murah namun prosesnya lama karena harus dilakukan secara manual dan satu per satu. Adapun solder kontrol suhu dan uap adalah solder yang timahnya berupa pasta dan beberapa komponen dapat disolder dalam waktu bersamaan sehingga lebih menghemat waktu [2]. Solder yang paling cocok untuk keperluan prototipe adalah yang berukuran kecil (hemat tempat), konsumsi dayanya rendah dan *loading/unloading*-nya mudah.

Solder reflow berbasis fuzzy telah diimplementasikan pada Atmega16 dengan setpoint suhu bernilai tetap selama proses penyolderan [3]. Solder reflow model blower juga telah dikembangkan dengan profil penyolderan yang dapat diatur melalui halaman website [4]. Solder reflow dengan kontroler algoritma genetika telah dikembangkan dengan kemampuan memprediksi profil penyolderan. Solder reflow ini diklaim dapat menghemat konsumsi daya listrik serta mempersingkat waktu penyolderan [5]. Solder reflow model plat telah dikembangkan dengan kontroler on/off dan driver heater berupa SSR (Solid State Relay). Kelemahan utama solder ini ialah suhu aktualnya berfluktuasi atau naik-turun disekitar setpoint [6]. Perbandingan unjuk kerja kontroler on/off, PID and fuzzy pada system pemanas ruang telah dilakukan dan didapatkan hasil bahwa kontroler fuzzy memberikan unjuk kerja lebih baik dan konsumsi daya listrik yang lebih rendah [7], [8].

Berdasarkan uraian tersebut maka artikel ini akan membahas perancangan solder reflow model plat berbasis kontrol logika fuzzy menggunakan ESP32 untuk menunjang prototipe produk elektronik yang cepat dan efisien.

2. METODE PENELITIAN

Solder reflow model plat hakikatnya merupakan kontrol *tracking* terhadap suhu yang setpointnya berubah-ubah berdasarkan waktu seperti yang dinyatakan oleh pola atau profil penyolderan. Contoh profile penyolderan ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Profile penyolderan [9]

Solder reflow model plat harus dapat membangkitkan suhu pada plat yang polanya seperti profile penyolderan, yaitu memuat fase preheating, melting dan cooling. Jika PCB dan komponen yang hendak disolder diletakkan pada plat tersebut maka timah pasta dan komponen yang terpasang pada PCB itu akan mendapatkan pemanasan sesuai profile penyolderan. Pemanasan yang memiliki pola seperti itu telah diteliti dapat melelehkan timah pasta tanpa merusak komponen dan tidak memunculkan cacat penyolderan seperti tombstone, balling/ beading, poor wetting, voiding, dan dull/grainy joint [10]. Nilai suhu dan waktu pada profile tersebut tergantung pada bahan dan komposisi solder pasta [11], [12]. Dengan demikian, setpoint sistem kendali suhu solder reflow ini setiap saat harus

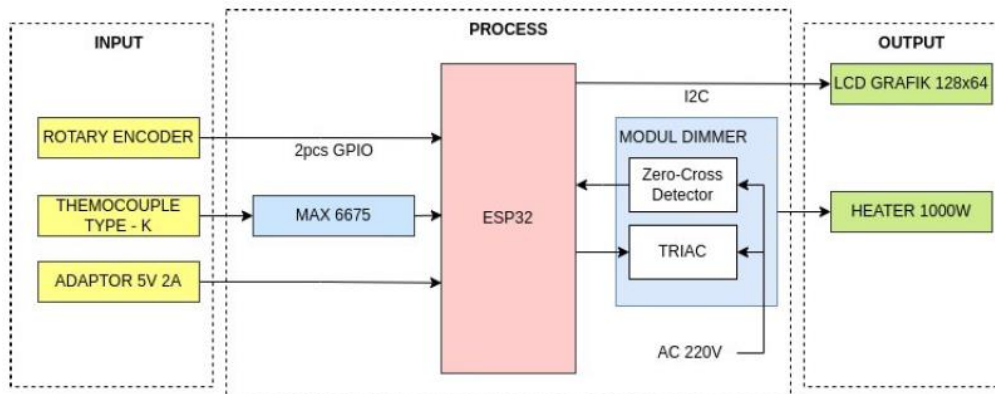


dihitung berdasarkan profil penyolderan. Kemudian suhu aktual pada plat penyolder dibaca menggunakan sensor suhu untuk dibandingkan dengan nilai setpoint. Nilai error dan delta error suhu diproses secara fuzzy oleh mikrokontroler lalu hasilnya dikirimkan ke aktuator. Jika hasil tersebut bernilai positif maka akan dikirim ke driver heater. Sebaliknya jika hasil tersebut bernilai negative maka akan dikirim ke driver cooler. Proses ini diulang terus-menerus hingga akhir dari profil penyolderan.

Solder reflow model plat ini dibuat dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menetapkan spesifikasi hardware dan software berdasarkan tujuan pembuatan alat.
2. Merancang hardware (mekanik dan rangkaian).
3. Merancang software (flowchart dan kode program C/C++).
4. Merealisasi dan menguji hardware/software perbagian.
5. Merealisasi dan menguji hardware/software keseluruhan.
6. Mengevaluasi hasil solderan.
7. Jika hasil belum memuaskan maka mengulang ke tahapan sebelumnya.

2.1 Diagram Blok

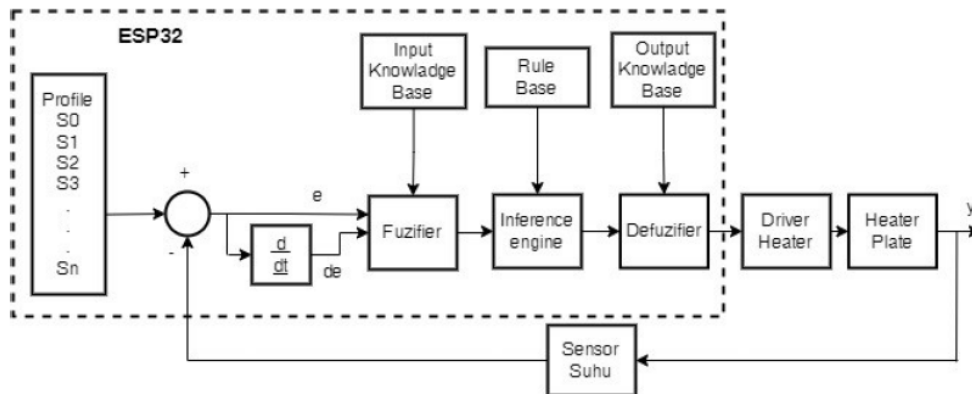


Gambar 2: Diagram blok solder reflow.

Diagram alat solder reflow dirancang seperti dalam Gambar 2. Solder reflow tersusun atas blok input, proses dan output. Bagian input bertugas mengirim masukan ke blok proses dan bagian output menerima perintah dari blok proses. Bagian input mencakup rotary encoder, thermocouple tipe K dan Adaptor 5V 2A. Rotary encoder digunakan sebagai perangkat pemilih menu dalam pengelolaan profil penyolderan dan mengontrol start/stop penyolderan. Thermocouple berfungsi untuk membaca suhu actual plat penyolderan. Adaptor 5V 2A bertugas memberikan catu daya kepada blok pemroses. Bagian proses terdiri atas ESP32, MAX6675 dan modul dimmer. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali solder reflow. MAX6675 bertugas menerima output thermocouple untuk diolah menjadi sinyal suhu digital yang dapat diproses oleh ESP32. Modul dimmer bertugas menerima sinyal perintah dari ESP32 yang akan mengatur redup/terang heater. Blok output terdiri atas LCD grafik dan Heater. LCD grafik bertugas menampilkan tulisan informasi dan gambar profil penyolderan. Heater berfungsi memberikan pemanasan kepada plat penyolderan. Adapun diagram blok kontrol alat ditunjukkan dalam Gambar 3. Setpoint berupa data yang diambil setiap detik dari profil penyolderan. Kontroler fuzzy dirancang menggunakan 2 keanggotaan input, error dan delta error yang masing-masing berbentuk segitiga sebanyak 5 buah. Kontroler fuzzy juga dirancang menggunakan 1 keanggotaan output berbentuk segitiga dan rule sebanyak 25 buah yang diinferensi menggunakan metode Mamdani (max min) dan agregasi atau defuzzifikasi output menggunakan metode CoA (Center of Area). Sinyal error (e) menyatakan selisih antara setpoint dengan nilai actual yang dibaca dari sensor. Sedangkan sinyal delta error (de) adalah selisih antara

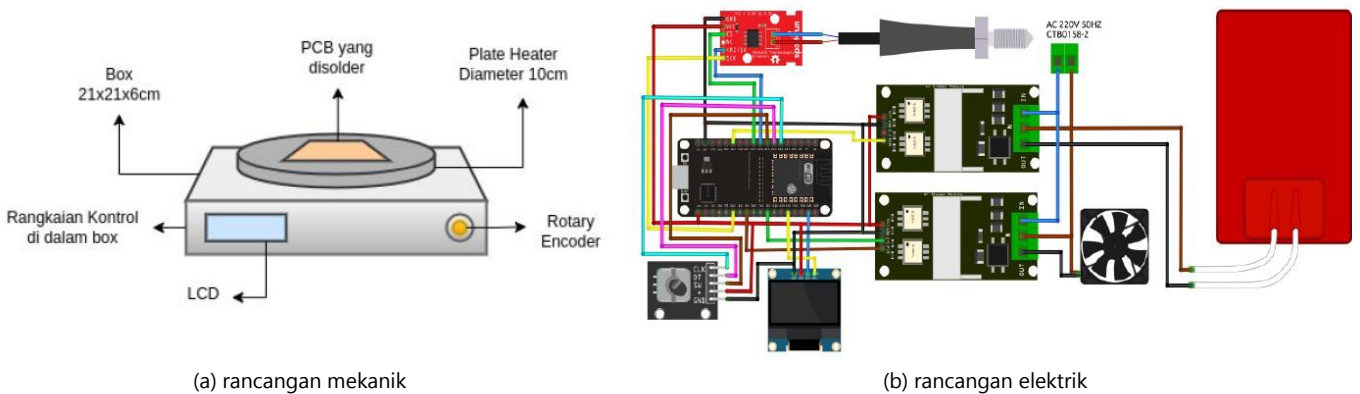


error sekarang dengan error sebelumnya. Algoritma kontrol logika fuzzy diimplementasikan dalam bentuk program C/C++ menggunakan library eFFL dan ditanamkan pada ESP32.



Gambar 3: Diagram blok kontrol solder reflow.

2.2 Perancangan Hardware



Gambar 4: Rancangan hardware.

Rancangan hardware ditunjukkan dalam Gambar 4. Alat solder reflow ini terdiri atas rotary encoder untuk memilih menu program, LCD OLED untuk menampilkan profile penyolderan, heater untuk menaikkan suhu, dan cooler (ada didalam box) untuk menurunkan suhu. Rangkaian kontrol (Gambar 4.b) diletakkan didalam alat tersebut. Adapun alokasi pin ESP32 untuk setiap sensor/actuator ditunjukkan TABEL I.

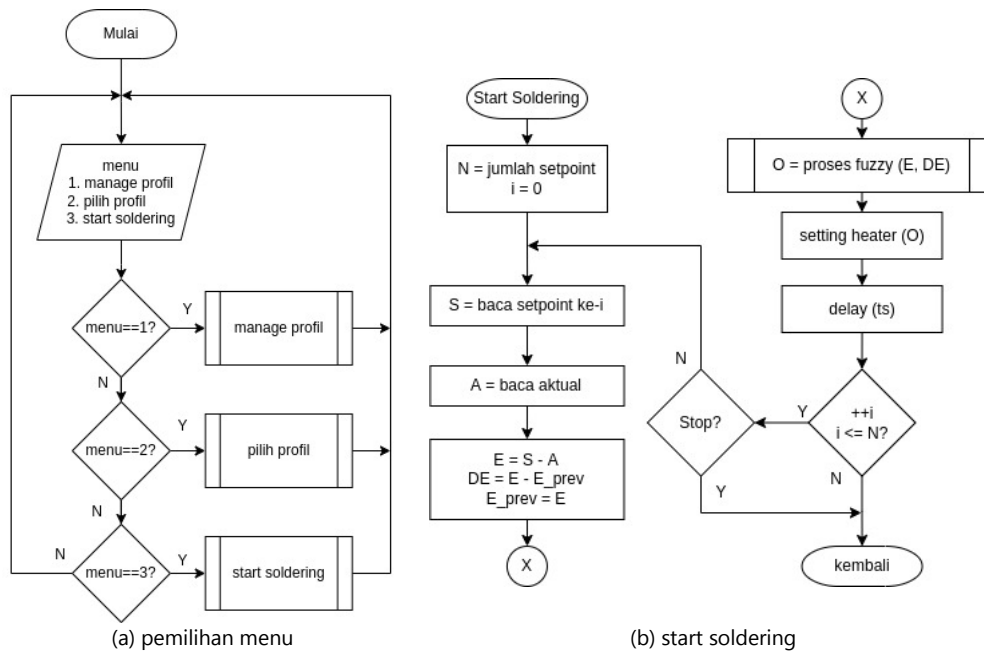
TABEL I: Alokasi pin ESP32.

| Pin ESP32 | Alokasi | Peripheral |
|----------------|------------|----------------|
| GPIO22/SCL I2C | SCL | OLED |
| GPIO1/TX UART0 | TX | Serial Monitor |
| GPIO3/RX UART0 | RX | Serial Monitor |
| GPIO21/SDA I2C | SDA | OLED |
| GPIO5/CS0 VSPI | ZCD | Dimmer-Cooler |
| GPIO4/ | PSM_collor | Dimmer-Cooler |
| GPIO2/ | - | - |



| | | |
|----------------|--------------------|---------------------------------|
| GPIO15/ 3V3 | CLK_MAX6675 VCC | MAX6675 OLED, KY040, MAX6675 |
| GPIO32/ | PIN-A/CLK | KY040 |
| GPIO33/ | PIN-B/DT | KY040 |
| GPIO25/ | SWITCH/SW | KY040 |
| GPIO26/ | D0_MAX6675 | MAX6675 |
| GPIO27/ | CS_MAX6675 | MAX6675 |
| GPIO12/ | PSM_heater | Dimmer-Heater |
| GND | GND | Semua |

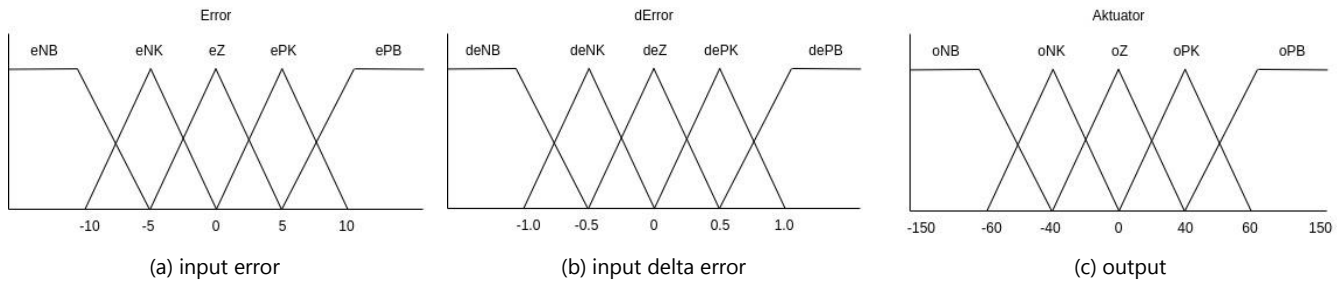
2.2 Perancangan Software



Gambar 5: Diagram alir alat.

Software solder reflow dirancang berdasarkan diagram alir dalam Gambar 5. Terlihat bahwa software alat (Gambar 5.a) dilengkapi tiga menu program, meliputi: manage profile, pilih profile dan start soldering. Menu manage profile untuk membuat profile dan menghapus profile. Menu pilih profile untuk memilih profile yang akan digunakan dalam proses penyolderan. Sedangkan menu "start soldering" untuk memulai proses penyolderan. Jika menu ini dimasuki maka alat akan bekerja sesuai diagram alir yang ditunjukkan dalam Gambar 5.b. Ketika proses penyolderan berlangsung, secara berulang program membaca setpoint ke-i, membaca suhu actual, menghitung error dan delta error, menjalankan fuzzy dan mengeluarkan hasil fuzzy ke actuator. Adapun rancangan keanggotaan fuzzy ditunjukkan dalam Gambar 6.





Gambar 6: Rancangan keanggotaan fuzzy.

Adapun rancangan rule fuzzy-nya ditunjukkan dalam TABEL II. Keanggotaan fuzzy dan rule fuzzy ini diimplementasikan menggunakan library eFLL seperti dalam

LISTING I.

TABEL II: Rancangan rule fuzzy.

| Error/dError | deNB | deNK | deZ | dePK | dePB |
|--------------|------|------|-----|------|------|
| eNB | oNB | oNB | oNK | oNK | oZ |
| eNK | oNB | oNK | oNK | oZ | oPK |
| eZ | oNK | oNK | oZ | oPK | oPK |
| ePK | oNK | oZ | oPK | oPK | oPB |
| ePB | oZ | ePK | oPK | oPB | oPB |

LISTING I: Kode program untuk mendefinisikan keanggotaan, rule dan proses fuzzy.

```

Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();

FuzzySet *eNB = new FuzzySet(-20, -20, -15, -5);
FuzzySet *eNK = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
FuzzySet *eZ = new FuzzySet(-5, 0, 0, 5);
FuzzySet *ePK = new FuzzySet(0, 5, 5, 10);
FuzzySet *ePB = new FuzzySet(5, 15, 20, 20);

FuzzyInput *error = new FuzzyInput(1);
error->addFuzzySet(eNB);
error->addFuzzySet(eNK);
error->addFuzzySet(eZ);
error->addFuzzySet(ePK);
error->addFuzzySet(ePB);
fuzzy->addFuzzyInput(error);

FuzzySet *deNB = new FuzzySet(-2.0, -2.0, -1.5, -0.5);
FuzzySet *deNK = new FuzzySet(-1.0, -0.5, -0.5, 0);
FuzzySet *deZ = new FuzzySet(-0.5, 0, 0, 0.5);
FuzzySet *dePK = new FuzzySet(0, 0.5, 0.5, 1.0);
FuzzySet *dePB = new FuzzySet(0.5, 1.5, 2.0, 2.0);

FuzzyInput *derror = new FuzzyInput(2);
derror->addFuzzySet(deNB);
derror->addFuzzySet(deNK);
derror->addFuzzySet(deZ);
derror->addFuzzySet(dePK);
derror->addFuzzySet(dePB);
fuzzy->addFuzzyInput(derror);

FuzzySet *oNB = new FuzzySet(-150, -150, -60, -30);
FuzzySet *oNK = new FuzzySet(-60, -30, -30, 0);
FuzzySet *oZ = new FuzzySet(-30, 0, 0, 30);
FuzzySet *oPK = new FuzzySet(0, 30, 30, 60);
FuzzySet *oPB = new FuzzySet(30, 60, 150, 150);

FuzzyOutput *output = new FuzzyOutput(1);
output->addFuzzySet(oNB);
output->addFuzzySet(oNK);
output->addFuzzySet(oZ);
output->addFuzzySet(oPK);
output->addFuzzySet(oPB);
fuzzy->addFuzzyOutput(output);

FuzzyRuleAntecedent *if_eNB_deNB = new FuzzyRuleAntecedent();
if_eNB_deNB->joinWithAND(eNB, deNB);
FuzzyRuleAntecedent *if_eNB_deNK = new FuzzyRuleAntecedent();
if_eNB_deNK->joinWithAND(eNB, deNK);
FuzzyRuleAntecedent *if_eNB_deZ = new FuzzyRuleAntecedent();
if_eNB_deZ->joinWithAND(eNB, deZ);
FuzzyRuleAntecedent *if_eNB_dePK = new FuzzyRuleAntecedent();
if_eNB_dePK->joinWithAND(eNB, dePK);
FuzzyRuleAntecedent *if_eNB_dePB = new FuzzyRuleAntecedent();
if_eNB_dePB->joinWithAND(eNB, dePB);

FuzzyRule *R1 = new FuzzyRule(1, if_eNB_deNB, then_oNB);
fuzzy->addFuzzyRule(R1);
FuzzyRule *R2 = new FuzzyRule(2, if_eNB_deNK, then_oNB);
fuzzy->addFuzzyRule(R2);
FuzzyRule *R3 = new FuzzyRule(3, if_eNB_deZ, then_oNK);
fuzzy->addFuzzyRule(R3);
FuzzyRule *R4 = new FuzzyRule(4, if_eNB_dePK, then_oNK);
fuzzy->addFuzzyRule(R4);
FuzzyRule *R5 = new FuzzyRule(5, if_eNB_dePB, then_oZ);
fuzzy->addFuzzyRule(R5);

FuzzyRule *R21 = new FuzzyRule(21, if_ePB_deNB, then_oZ);
fuzzy->addFuzzyRule(R21);
FuzzyRule *R22 = new FuzzyRule(22, if_ePB_deNK, then_oPK);
fuzzy->addFuzzyRule(R22);
FuzzyRule *R23 = new FuzzyRule(23, if_ePB_deZ, then_oPK);
fuzzy->addFuzzyRule(R23);
FuzzyRule *R24 = new FuzzyRule(24, if_ePB_dePK, then_oPB);
fuzzy->addFuzzyRule(R24);
FuzzyRule *R25 = new FuzzyRule(25, if_ePB_dePB, then_oPB);
fuzzy->addFuzzyRule(R25);

...

fuzzy->setInput(1, error);
fuzzy->setInput(2, derror);

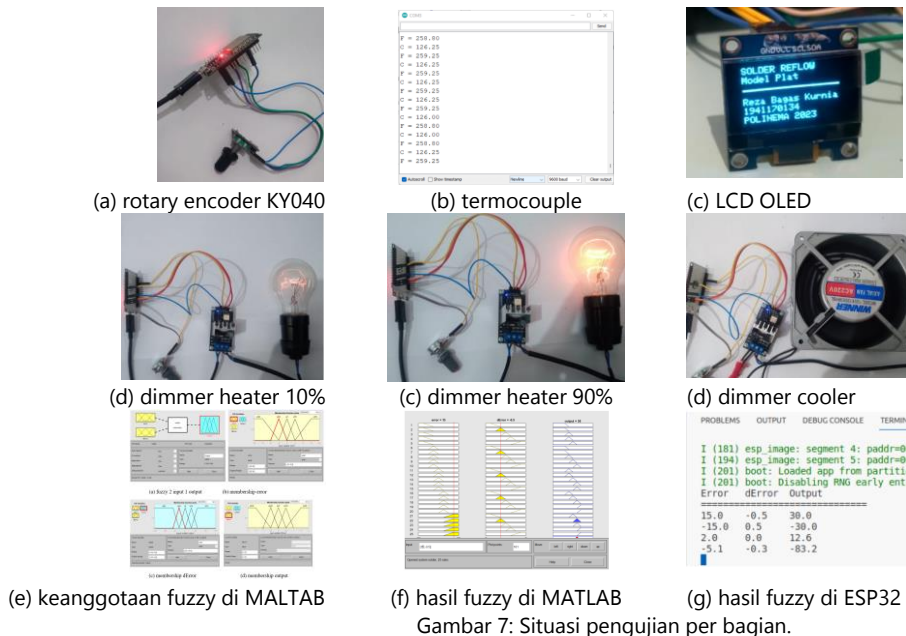
fuzzy->fuzzify();
double output = fuzzy->defuzzify(1);
    
```



3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hardware Perbagian

Rancangan hardware dan software selanjutnya diwujudkan secara parsial atau per bagian dan diuji untuk memastikan bahwa rancangan tersebut dapat bekerja seperti yang diharapkan. Situasi pengujian alat per bagian ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 7: Situasi pengujian per bagian.

TABEL III: Pengujian termocouple.

| No | Termometer(°C) | Pembacaan alat (°C) | Error (°C) |
|----|----------------|---------------------|------------|
| 1 | 25 | 26 | -1 |
| 2 | 35 | 35 | 0 |
| 3 | 45 | 47 | -2 |
| 4 | 50 | 49 | 1 |
| 5 | 60 | 63 | -3 |
| 6 | 70 | 68 | 2 |
| 7 | 100 | 100 | 0 |
| 8 | 160 | 158 | 2 |
| 9 | 200 | 199 | 1 |
| 10 | 230 | 232 | -2 |

TABEL IV: Pengujian aktuator

| ADC Potensio | Daya Heater (%) | Daya Cooler (%) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 25 | 25 | 25 |
| 50 | 50 | 50 |
| 75 | 75 | 75 |
| 96 | 100 | 100 |

TABEL V: Pengujian fuzzy.

| No | Error | dError | MATLAB | ESP32 | Error |
|----|-------|--------|--------|-------|-------|
| 1 | 15 | -0,5 | 30 | 30 | 0 |
| 2 | -15 | 0,5 | -30 | -30 | 0 |
| 3 | 2 | 0 | 12,6 | 12,6 | 0 |
| 4 | -5,11 | -0,3 | -83,9 | -83,2 | 0,7 |

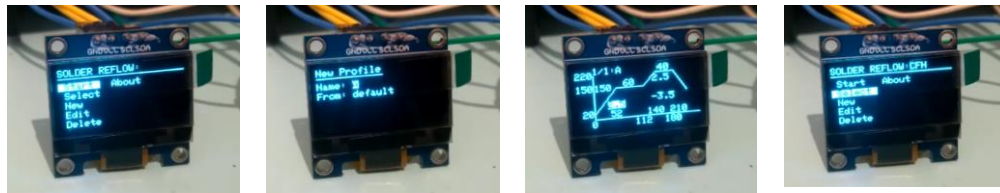
Data hasil pengujian thermocouple, aktuator dan kontrol logika fuzzy, masing-masing ditunjukkan dalam TABEL III, TABEL IV, dan TABEL V. Pengujian terhadap thermocouple (TABEL III) memiliki absolut error rata-rata $(1+0+2+1+3+2+2+1+2)/10 = 14/10 = 1,4$ atau prosen terhadap rata-rata termometer sebesar $(14/97,5) \times 100\% = 14,35\%$. Pengujian terhadap aktuator (TABEL IV) menunjukkan hasil dimmer dapat menyalakan heater atau cooler sebanding dengan nilai potensio. Pengujian terhadap algoritma fuzzy (TABEL V) menunjukkan satu error pada



pengujian ke-4 sebesar $(0,7/83,2) \times 100\% = 0,84\%$. Hasil-hasil ini mengorfimasi bahwa komponen per bagian telah bekerja dengan baik.

3.2 Management Profile Penyolderan

Tampilan LCD terhadap software pengelola profile penyolderan ditunjukkan dalam Gambar 8.



(a) menu (b) new profile (c) edit profile (d) select profile

Gambar 8: Management profile penyolderan.

Menu-menu program yang disediakan untuk mengelola profile penyolderan dan menjalankan proses penyolderan meliputi: Start, Select, New, Edit, Delete, seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.a. Ketika menu New dijalankan maka akan tampak konfigurasi seperti dalam Gambar 8.b. Melalui tampilan ini pengguna dapat memilih nama profile dan sumber profile yang akan dijadikan nilai awal pada profile baru. Selanjutnya profile baru dapat diedit seperti tampilan Gambar 8.c. Ketika menu Edit dijalankan maka tampilan dan cara kerja program akan serupa dengan cara kerja program pada saat pembuatan profile baru.

3.3 Penggabungan Keseluruhan

Alat keseseluruhan hasil penggabungan komponen perbagian ditunjukkan dalam Gambar 9.

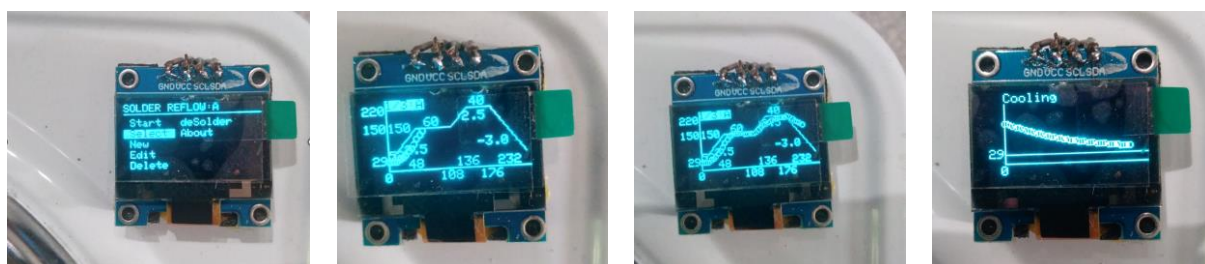


(a) alat tampak luar (b) alat tampak dalam

Gambar 9: Tampilan alat keseluruhan.

3.4 Penyolderan

Solder reflow yang telah dibuat selanjutnya diuji untuk menyolder beberapa PCB rangkaian flipflop. Tampilan LCD pada saat proses penyolderan ditunjukkan dalam Gambar 10.

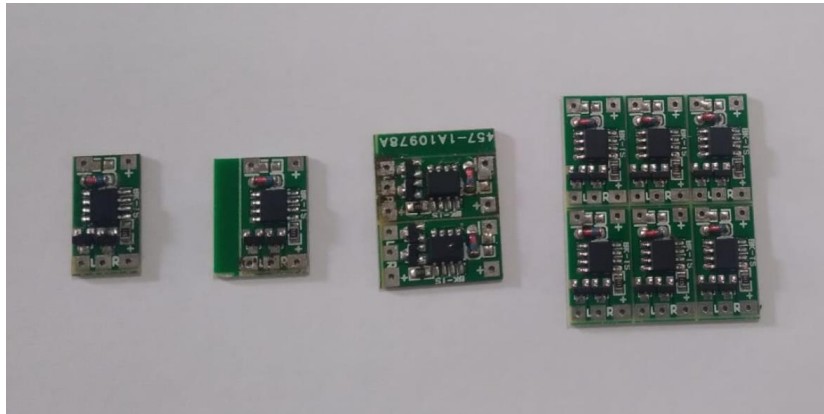


(a) select profile (b) preheating (c) heating dan melting (d) cooling

Gambar 10: Tahapan penyolderan.

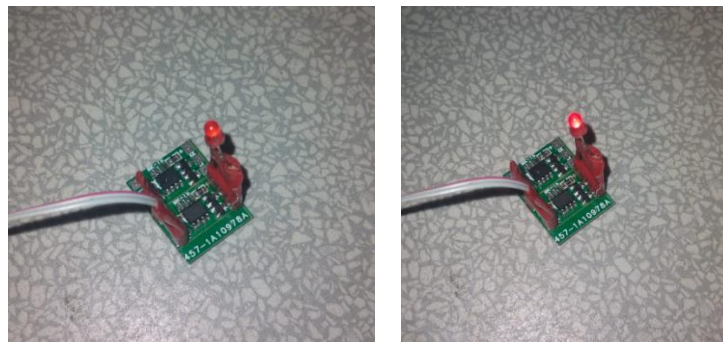
Beberapa contoh PCB hasil penyolderan ditunjukkan dalam Gambar 11.





Gambar 11: Hasil penyolderan.

Secara visual terlihat bahwa tidak ada PCB yang mengandung cacat penyolderan (tombstone, balling/ beading, poor wetting, voiding, dan dull/grainy joint). Adapun pengecekan fungsi terhadap PCB hasil penyolderan dilakukan dengan menyambungkan LED dan catu daya 12V ke PCB tersebut, seperti ditunjukkan dalam Gambar 12.



(a) LED kedip mati

(b) LED kedip nyala

Gambar 12: Situasi pengujian hasil solderan.

Hasil pengujian secara lengkap dan juga prosenstase error suhu hasil perhitungan ESP32 ditunjukkan dalam TABEL VI.

TABEL VI: Keadaan komponen setelah penyolderan.

| Sample PCB | Profile | Keadaan komponen/ fungsi | Error (%) |
|------------------|---------|--------------------------|------------|
| PCB1 | A | Baik | 5,0 |
| PCB2 | A | Baik | 6,0 |
| PCB3 | A | Baik | 5,0 |
| PCB4 | A | Baik | 5,5 |
| PCB5 | A | Baik | 6,5 |
| PCB6 | B | Baik | 4,0 |
| PCB7 | B | Baik | 6,0 |
| PCB8 | B | Baik | 5,0 |
| PCB9 | B | Baik | 5,5 |
| PCB10 | B | Baik | Baik |
| Rata-rata | | | 5,3 |



Terlihat bahwa penyolderan dapat berjalan dengan baik tanpa cacat penyolderan dan error suhu rata-rata terhadap 10 kali penyolderan sebesar 5,3%.

3.3 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Kontrol suhu pada solder reflow dirancang dengan urutan kerja: membaca data setpoint dari profile penyolderan, membaca suhu aktual, menghitung error suhu dan delta error suhu, menjalankan fuzzifikasi-inferensi-defuzzifikasi, mengirim hasil fuzzy ke aktuator heater dan kipas, mengulang ke awal hingga akhir dari profile penyolderan.
2. Komponen pendukung solder reflow meliputi: ESP32 sebagai kontroler suhu, rotary encoder KY040 sebagai device input pemilih profile penyolderan, LCD OLED 128x64 sebagai display, termocouple tipe K dan MAX6675 sebagai sensor suhu, heater dan kipas sebagai aktuator dan dimmer Robotdyn sebagai driver heater maupun kipas.
3. Algoritma fuzzy dirancang dengan: input error suhu 5 keanggotaan, input delta error suhu 5 keanggotaan, output 5 keanggotaan, 25 rule fuzzy, penalaran fuzzy berjenis max-min dan defuzzifikasi berjenis CoA (Center of Area). Secara software fuzzy diimplementasikan menggunakan library eFLL.
4. Kontroler suhu berbasis logika fuzzy yang diimplementasikan pada ESP32 terbukti dapat mengontrol suhu plat sesuai profile penyolderan dengan error suhu rata-rata sebesar 5,3%.
5. Solder reflow yang direncanakan berhasil diwujudkan dengan baik, yaitu mampu menyolder tanpa menimbulkan tombstone, balling/ beading, poor wetting, voiding, dan dull/grainy joint, serta komponen yang disolder tidak rusak atau dapat berfungsi normal.

4. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada para pembimbing skripsi, Bapak Sidik Nurcahyo dan Bapak Eka Mandayatma, serta Bapak/Ibu dosen dan segenap civitas akademik D4 Teknik Elektronika Politeknik Negeri Malang yang telah menyumbangkan ilmu dan pengalamannya selama penulis menempuh jenjang pendidikan pada program studi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dicoding, "Apa Itu Prototype? Kenapa Itu Penting? - Dicoding Blog," Jul. 01, 2022. <https://www.dicoding.com/blog/apa-itu-prototype-kenapa-itu-penting/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [2] B. Salam, C. Virseda, H. Da, N. N. Ekere, and R. Durairaj, "Reflow profile study of the Sn-Ag-Cu solder," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 27–34, Jan. 2004, doi: 10.1108/09540910410517022.
- [3] W. T. Wahono, T. Winarno, and F. Fathoni, "Implementasi Fuzzy Logic untuk Pengontrolan Suhu pada Proses Reflow Oven Soldering," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 3, no. 1, p. 2, Nov. 2020, doi: 10.33795/ELKOLIND.V3I1.59.
- [4] A. Nur Fajrin, D. Darlis, and R. Ardianto Priramadhi, "Alat Reflow Soldering Dengan Pengaturan Suhu Reflow Soldering Tool With Temperature Control," 2020.
- [5] S. Jing, M. Li, X. Li, and P. Yin, "Optimization of reflow soldering temperature curve based on genetic algorithm," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 772–782, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.09.195.
- [6] Electronoobs, "Homemade Reflow Hot plate for SMD components with Arduino," Jul. 01, 2022. http://electronoobs.com/eng_arduino_tut155.php (accessed Jun. 28, 2023).
- [7] G. Ulpiani, M. Borgognoni, A. Romagnoli, and C. Di Perna, "Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building," *Energy Build*, vol. 116, pp. 1–17, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.12.027.
- [8] P. Mondal and M. Mondal, "Engineering and Technology (A High Impact Factor)," *International Journal of Innovative Research in Science*, vol. 7, 2018, doi: 10.15680/IJRSET.2018.0707013.
- [9] Ablic, "Resistance to soldering heat condition for Package – ABLIC Inc.," Jul. 01, 2022. <https://www.ablic.com/en/semicon/support/package/solder-temp-profile/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [10] Iconnect007, "The Benefits of a Ramp-to-Spike Reflow Profile," Jul. 30, 2022. <http://smt.icconnect007.com/index.php/article/51868/the-benefits-of-a-ramp-to-spike-reflow-profile/51871/?skin=smt#:~:text=RTS%20has%20several%20advantages%20over,vehicle%20throughout%20the%20preheat%20stage.> (accessed Jun. 28, 2023).



- [11] K. Dušek, D. Bušek, P. Veselý, A. Pražanová, M. Plaček, and J. Del Re, "Understanding the Effect of Reflow Profile on the Metallurgical Properties of Tin–Bismuth Solders," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, p. 121, Jan. 2022, doi: 10.3390/MET12010121/S1.
- [12] E. H. Amalu, Y. T. Lui, N. N. Ekere, R. S. Bhatti, and G. Takyi, "Investigation Of The Effects Of Reflow Profile Parameters On Lead-free Solder Bump Volumes And Joint Integrity," *AIP Conf Proc*, vol. 1315, no. 1, pp. 639–644, Jan. 2011, doi: 10.1063/1.3552519.

